

Feinwanderung an elektrischen Kohle- Kohlekontakten

Neukirchen, Johannes

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 5, 1953, S. 63-68



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Feinwanderung an elektrischen Kohle-Kohlekontakten

Von Johannes Neukirchen, Mehlem a. Rh. *)

Mit 5 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn E. Justi

Summary: On carbon-carbon contacts operated with d. c. the author has observed carbon transfer in normal direction i. e. from the anode to the cathode, if the contact load does not exceed a certain value. This is the same direction as the well known "bridge transfer" in metal-metal contacts, although a liquid bridge cannot be formed in the gap of carbon-carbon contacts. This phenomenon is explained by the local heating of the anode, effected by electrons emitted from the cathode through the gap. Thus the anode is vapourized and carbon vapour condensed on the colder cathode. Anomalous transfer i. e. from the cathode to the anode may result, if the cathode is subjected to additional heat.

Erklärung der Begriffe

Die nachstehend beschriebenen Versuche und Ergebnisse an elektrischen Kontakten Kohle gegen Kohle sollen einen Beitrag zu dem Studium der an Metall-Metallkontakten beobachteten Feinwanderung liefern. Unter Feinwanderung versteht man [1] die Wanderung des Werkstoffes von dem einen auf das andere Kontaktglied beim Einschalten oder Abschalten des Stromes, wenn die an den Kontaktgliedern liegende Spannung so niedrig ist (< 10 bis 20 V, Minimalspannung des Lichtbogens), daß ein normaler Lichtbogen mit Anoden- und Kathodenfall nicht entstehen kann oder wenn, unbekümmert um die Höhe der Spannung, die Abstände zwischen den Kontaktgliedern so gering sind (10^{-4} bis 10^{-5} cm mittlere freie Weglänge der Elektronen in normaler Luft), daß für das Kathodenfallgebiet kein Platz vorhanden ist.

Bei der Feinwanderung wandert gewöhnlich das Metall der Anode zur Kathode. Auf der Anode entsteht dann ein Loch oder eine flache Grube, auf der Kathode ein Stift oder eine flache Warze.

Bei Spannungen oberhalb der Minimalspannung des Lichtbogens und Abständen von mehr als 10^{-4} bis 10^{-5} cm in normaler Luft entsteht an Kontakten der normale Lichtbogen. Die Stoffwanderung an den Kontakten in normalen Lichtbögen wird als Grobwanderung bezeichnet.

Zur Erklärung der Feinwanderung wurde die Theorie entwickelt, daß flüssige Metallbrücken durch thermoelektrische und elektrothermische Effekte an einer näher der Anode gelegenen Stelle überheizt und unterbrochen werden. Nach dieser Theorie (Holm) gehen die Kontaktglieder zusammen oder auseinander mit einem Verlust für die Anode und einem Gewinn für die Kathode.

*) Mitteilungen aus dem Laboratorium der Ringsdorf-Werke GmbH.

Eine andere Theorie [2] führt die Feinwanderung auf Verdampfung des anodischen Metalles zurück. Dieser Theorie liegt die Tatsache zugrunde, daß das anodische Kontaktglied stets heißer als das kathodische ist.

Auf die Tatsache der Temperaturasymmetrie der beiden Kontaktglieder wurde bereits von Holm und seinen Mitarbeitern [3] hingewiesen. Neuerdings hat Kohler [4] die Temperaturasymmetrie der beiden Kontaktglieder für Abstände von etwa zwei Moleküldicken (Gashaut) theoretisch errechnet. Sie beruht nach Kohler darauf, daß die durch Feldemission von der Kathode ausgehenden Primärelektronen in dem starken Feld des Kontaktpaltes Energie aufnehmen und diese ihre kinetische einschließlich ihrer potentiellen Energie an die Anode abgeben. Es scheint, daß ein ähnlicher Mechanismus auch bis zu Abständen der mittleren freien Weglänge der Elektronen in normaler Luft, also bis zu etwa 10^{-4} bis 10^{-5} cm, besteht.

Versuchsanordnung

Beim Experimentieren mit Kohle-Kohlekontakten konnten gelegentlich ebenfalls Gruben auf den anodischen und Warzen auf den kathodischen Kontaktgliedern festgestellt werden.

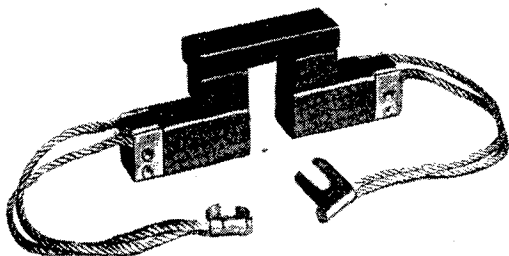


Abb. 1. Zwei Kohlebürsten mit aufgelegten Kohlestücken und Verbindungsbrücke.

Die im folgenden beschriebenen Versuche wurden unternommen, um die Bedingungen zu ermitteln, unter denen Gruben und Warzen auf den Kohlekontakten entstehen. Zwei Kohlebürsten (Abb. 1) mit einem Querschnitt von 20×20 mm liegen mit Abstand auf einer horizontalen Unterlage. Auf den Enden liegt je ein Kohlestück gleichen Materials von den Dimensionen $20 \times 20 \times 15$ mm. Auf diesen Stücken liegt eine stromleitende Brücke geringen Gewichtes. Die Kohlestücke $20 \times 20 \times 15$ mm sind ballig geschliffen, so daß sie die Bürsten mit ihren Mitten und nicht etwa mit ihren Rändern oder Ecken berühren. Das Material für Bürsten und Kohlestücke ist harte Kohle mit einem spezifischen Widerstand von etwa $15000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Die Brücke wird mit verschiedenen Gewichten belastet, um den Einfluß der Kontaktlast auf die Entstehung von Gruben und Warzen zu erkennen. Die Kohlekontakte werden mit Gleichstrom von etwa 80 bis 90 A schlagartig einige Sekunden lang belastet.

Versuchsergebnis

Das Versuchsergebnis ist in Abb. 2 dargestellt.

Die linke Bildreihe zeigt die anodischen und die rechte die kathodischen Kohlestücke mit ihren balligen Kontaktflächen. Die dargestellten Stücke sind nicht die zusammengehörigen Kontaktpartner. Die zugehörigen Kontaktpartner sind die Endflächen der Kohlebürsten, die hier nicht abgebildet sind. Neben jedem Kontaktpaar ist rechts die Kontaktlast je Kontakt angegeben. Man erkennt ohne weiteres die Gruben auf den anodischen und die Warzen auf den kathodischen Kohlestücken. Ferner erkennt man, daß bei einer Kontaktlast von etwa 500 g an aufwärts Gruben und Warzen verschwinden.

Deutung des Ergebnisses

Die Stromengegebiete der Kohlekontakte blasen bei der plötzlichen elektrischen Belastung ebenso plötzlich beträchtliche Mengen von Gas und Wasserdampf aus. Die für den Versuch gewählte Kohlenart (niedrig gegläute amorphe Kohle) ist besonders stark mit Gas und Luftfeuchtigkeit beladen. Die Kontakte werden also durch den Gasdruck vorübergehend getrennt, und zwar

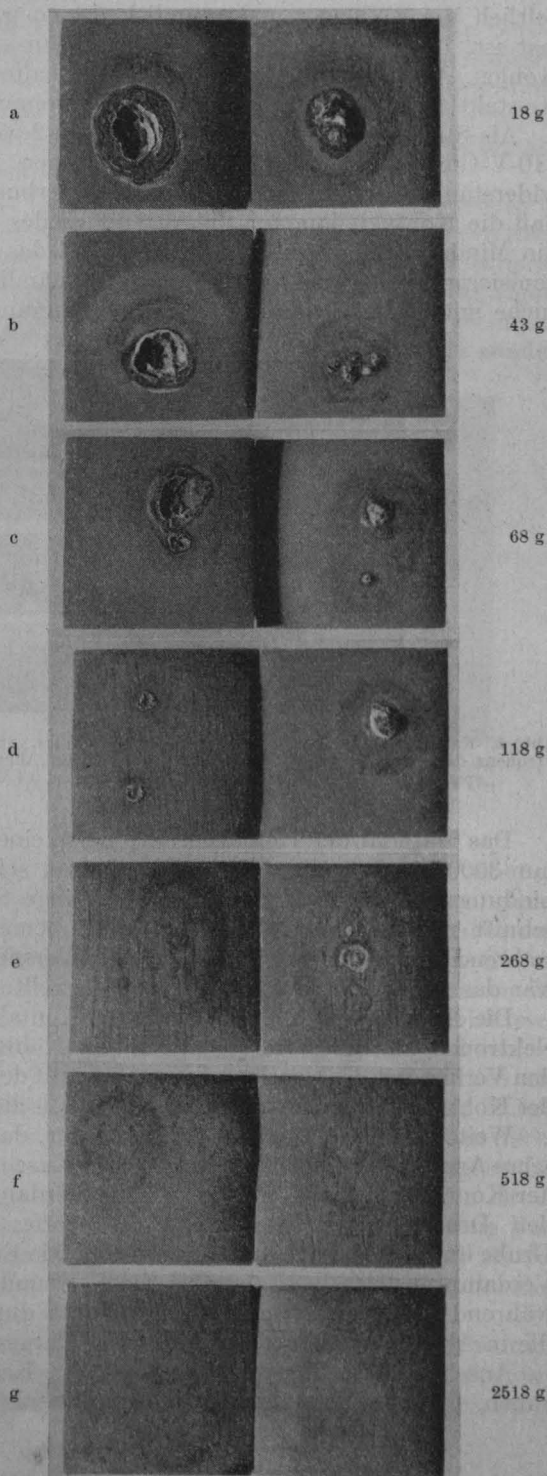


Abb. 2. Gruben auf den Kohleanoden (links) und Warzen auf den Kohlekathoden (rechts) in Abhängigkeit von der Kontaktlast. Vergrößerung = $\times 2,78$.
a) 18 g, b) 43 g, c) 68 g, d) 118 g, e) 268 g, f) 518 g, g) 2518 g Kontaktlast.

zeitlich um so länger und räumlich um so weiter, je kleiner die Kontaktlast ist. Unter den gegebenen Bedingungen — Gas- und Wassergehalt der Kohlen, Anstieg des Stromes beim Einschalten — reicht offensichtlich eine Kontaktlast von 500 g, um die Kontakttrennung zu verhindern.

Als Stromquelle diente bei den in Abb. 2 wiedergegebenen Versuchen eine 110-V-Gleichstrommaschine, die über einen passend gewählten Vorschaltwiderstand mit der Versuchsanordnung verbunden war. Um sicher zu sein, daß die Kontaktspannung im Augenblick des Einschaltens kleiner bleibt als die Mindestspannung des Lichtbogens — das theoretische Minimum ist die Ionisierungsspannung des Kohlenstoffes, nämlich 11,2 V —, wurden die Versuche mit einem Bleiakku von 6,4 V Spannung wiederholt.

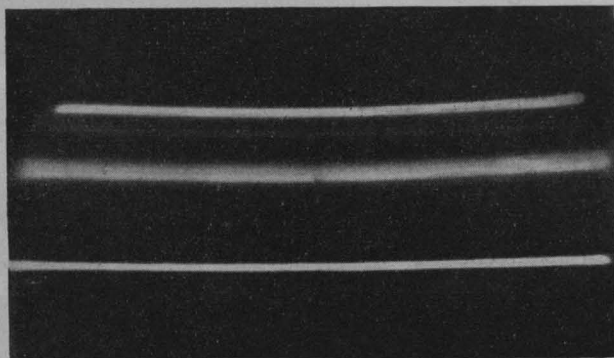


Abb. 3. Kathodenstrahl-Oszillogramm eines C-C-Kontaktes. Stromstärke: 200 Amp. Kontaktlast: 200 g. Frequenz der Zeitablenkung 50 Kilohertz. Spannung der Akkubatterie 6,4 V. Spitzen der Kontaktspannung 5,6 V. Kurven von unten nach oben: $\times 0,1$ V; $\times 3,7$ V; $\times 5,6$ V; $\times 6,4$ V

Das Material der Kohlekontakte hatte einen spezifischen Widerstand von nur $3000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, die Kontaktlast betrug schätzungsweise 100 g. Die Verbindungsleitungen waren sehr kurz (geringe Selbstinduktion) und im Querschnitt reichlich (geringer Widerstand) bemessen. Die Stromstärke betrug während der einige Sekunden dauernden Versuche 300 bis 350 A. Das Ergebnis war das gleiche wie das in Abb. 2 dargestellte.

Die Anode wird also durch die im Kontaktspalt beschleunigten Primärelektronen bis zur Siedetemperatur des Kohlenstoffes aufgeheizt und durch den Verlust von Kohlenstoff ausgehöhlt. Auf der kälteren Kathode kondensiert der Kohlenstoff als eine der Größe der anodischen Grube entsprechende Warze.

Weitere Beobachtungen sprechen dafür, daß die anfänglich durch stürmisches Ausströmen im Innern adsorbierter Gase und Dämpfe bewirkte Trennung der Kontaktglieder nach Einsetzen der Verdampfung des Kohlenstoffes durch den Druck des verdampften Kohlenstoffes selbst aufrechterhalten wird. Grube und Warze wachsen dann so lange, wie Energie zur hinreichend schnellen Verdampfung des Kohlenstoffes zur Verfügung steht. Der Kontaktspalt hat während des Wachstums im Querschnitt durch die beiden Kontaktglieder die in Abb. 3 (übertrieben dicker Spalt) dargestellte Form.

Anschließend Messungen mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen ergaben, daß die Spannungen an den Kontakten im Höchstfalle 5,6 V, also

kleiner als die Akkuspannung (6,4 V) waren. Auf dem Schirm des Oszillographen konnte ein stehendes Bild der unregelmäßig schwankenden Spannungs-kurve photographisch nicht festgehalten werden. Aus diesem Grunde wurde die Zeitablenkung mit der bei dem verwandten Gerät größtmöglichen Frequenz von 50 Kilohertz bestätigt, so daß die Spannungsspitzen zu einer Linie ausgezogen wurden (siehe Abb. 3).

Damit dürfte der Einwand entkräftet sein, daß die Kontaktspannung an dem Zitterkontakt durch die unvermeidliche kleine Selbstinduktion des Kurzschlußkreises die Ionisierungsspannung des Kohlenstoffs von 11,2 V erreiche, also einen kürzesten Kontaktlichtbogen mit seiner Minimalspannung zünde. Der gemessene Höchstwert der Kontaktspannung reicht erst recht nicht aus, um einen normalen Lichtbogen mit vollentwickeltem Anodenfall zu zünden.

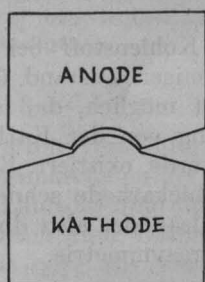


Abb. 4. Kontaktpalt während des Wachstums von Grube und Warze

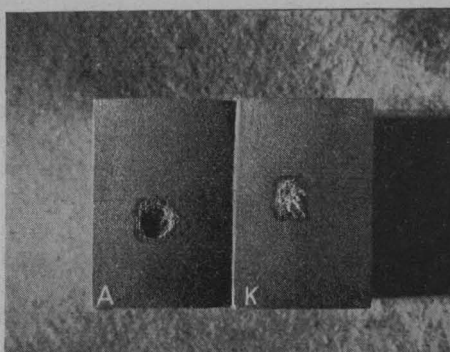


Abb. 5. Kontaktpaar aus Elektrographit mit sehr geringem Gehalt an Gas und Wasser nach einer Belastung mit etwa 400 A

Ferner gelang es, große Gruben und Warzen bei Kontakten aus einer an Gas und Wasser sehr armen elektrographitisierten Kohle ($2000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) durch Belastung mit 400 A (Abb. 4) zu erhalten. Viele Zentimeter große Gruben und Warzen wurden auf Graphitplatten beobachtet, die in überheizten Gleichstromöfen (4000 A) elektrographitisiert worden waren. Auch hier zeigten die jeweils anodischen Enden der wie ein Mauerwerk übereinandergeschichteten Platten die Gruben und die kathodischen Enden der Platten die Warzen.

Durch Einstich mit einer Messerschneide ließen sich gelegentlich die Warzen von der völlig unversehrten Unterlage ablösen. Man kann mit Sicherheit sagen, daß die Platten vor der Entstehung der Gruben und Warzen durch das stundenlange Glühen bei extrem hohen Temperaturen völlig entgast und ausgetrocknet waren, daß also in diesem Falle die Kontakte durch den Druck des verdampften Kohlenstoffs getrennt wurden. Die hier vorgetragene Vorstellung von der tragenden Dampfhaut bei Kohlekontakten erinnert an das Leidenfrostsche Phänomen des auf seiner Dampfhaut über einer glühenden Metallplatte schwebenden Wassertropfens.

Die abgewanderten und zugewanderten Mengen des Kohlenstoffs wurden theoretisch aus der Verdampfungswärme des Kohlenstoffs und der aufgewendeten elektrischen Energie errechnet und mit den praktisch gemessenen Stoff-

verlusten oder Stoffgewinnen verglichen. Es wurde praktisch nur etwa $\frac{1}{50}$ der theoretisch erwarteten Mengen gefunden. Das dürfte daran liegen, daß die eigentliche Verdampfung nur in Bruchteilen der Gesamtzeit der elektrischen Belastung des Zitterkontaktes stattfindet. Das Kathodenstrahloszillogramm der Stromstärkeschwankungen läßt deutlich einzelne Stromimpulse erkennen. Außerdem mußte festgestellt werden, daß die anodischen Kontaktstücke bei kurzen Belastungen von $\frac{1}{2}$ bis 2 Sekunden trotz Materialverlustes im Krater an Gewicht zunahmen. Vermutlich nimmt bei der stärkeren Erwärmung Graphit beträchtliche Mengen Sauerstoff auf.

Die Untersuchungen werden später fortgesetzt.

Zusammenfassung

Die an Kohle-Kohlekontakten beobachtete Feinwanderung des Kohlenstoffes von der Anode zur Kathode kann nur durch die Verdampfung von anodischem Kohlenstoff erklärt werden.

Die Brückentheorie ist nicht anwendbar, da Kohlenstoff bei 4000 °K unmittelbar vom festen Zustand in den dampfförmigen Zustand übergeht. Schmelzflüssiger Kohlenstoff ist unbekannt. Es ist möglich, daß auch bei Kohlenstoff die sogenannte anomale Feinwanderung von der Kathode zur Anode, wie sie gelegentlich bei Metallen gefunden wurde, existiert. Es könnte ja sein, daß eine zusätzlich künstlich geheizte Kohlekathode schneller verdampft als die zugehörige natürlich geheizte Kohleanode, also durch eine künstliche Umkehrung der natürlichen Temperaturasymmetrie.

Literatur

- [1] R. Holm, Deutsche Ausgabe: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Springer, Berlin 1941.
Englische Ausgabe: Electric Contacts, Almquist och Wiksells Akademiska Handböcker. Geber, Stockholm 1946.
- [2] L. H. Germer und F. E. Haworth, Erosion of Electrical Contacts on Make. Journal of Applied Physics, Vol. 20, No. 11, November 1949, p. 1085.
- [3] R. Holm, F. Güldenpfennig und R. Störmer, Die Materialwanderung in elektrischen Abhebekontakten. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken, XIV. Bd., 1. Heft. Springer, Berlin 1935.
- [4] E. Justi und H. Schultz, Neue Versuche zur Deutung der Feinwanderung in elektrischen Abhebekontakten. Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Bd. I, Nr. 1, 1949.